琉球大学学術リポジトリ

亜熱帯の塩害環境下における耐力壁の耐震性能に関する実験的研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2008-03-31 キーワード (Ja): キーワード (En): Aseismatic behavior, Corrosion, Reinforced concrete, Exposure test, Seismic hazard zoning, New fiver reinforced composite material, Durability, Chroride attack environment, Structural walls, Soldium chloride solution 作成者: 山川, 哲雄, 伊良波, 繁雄, 玉城, 康哉, 松永, 尚凡, 枇杷田, 篤, Yamakawa, Tetsuo, Iraha, Shigeo, Tamaki, Yasuya, Matsunaga, Takamina, Biwada, Atsushi メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/5470

亜熱帯の塩害環境下における耐力壁の耐震性能に関する実験的研究

山川哲雄*　伊良波繁雄**
玉城康哉***　松永尚凡***　枇杷田篤***

An Experimental Study on Damage Affecting Aseismatic Behavior of Structural Walls Under Chloride Attack Environment in the Semitropical Region

Tetsuo YAMAKAWA*　Shigeo IRAHA**
Yasuya TAMAKI***　Takamina MATSUNAGA***　and Atsushi BIWADA***

Abstract

Numerous investigations on corrosion and corrosion protection of steel in concrete have been carried out until today. However, most of these studies are almost limited in the field of materials engineering, for example, main subjects are as follows.

1) Mechanics and mechanisms of steel corrosion, and evaluation of corrosion data.
2) Corrosion monitoring in field structures and corrosion protection.
3) Prediction of service life and repair methods.

On the other hand, the influence of corrosion on flexural, shear and bond strength of reinforced concrete members has been discussed on beams and floor slabs. Japan is located in the seismic hazard zoning area. Therefore, in this paper the damage affecting aseismatic behavior of reinforced concrete structural members due to corrosion of steel reinforcing bars is discussed through experiments under the constant axial load and alternately repeated lateral loads.

As the first step, structural walls were adopted as the test specimens. Because the coverage thickness, namely, the concrete protective covering for reinforcement is small and the corrosion area is large for reinforcing bars in structural walls. Furthermore, a new fiber reinforced composite material (NFM) instead of steel bars was used in order to investigate durability of the structural walls under

受理：1993年5月10日

* 工学部建設工学科　Dept. of Architectural Eng., Fac. of Eng.
** 工学部土木工学科　Dept. of Civil Eng., Fac. of Eng.
*** 大学院工学研究科建設工学専攻　Graduate Student, Architectural Eng.

chroride attack environment in the semitropical region.

A wall panel size was 800x950*mm* and its thickness was 80*mm*. The rigid edge beams were attached to the top and bottom of the wall panel. The shear-span ratio *M/Qd* was 1.43. The weight of a test specimen was about 1*tonf*. The reinforcing bars, whose diameter was 6*mm*, were arranged as likely mesh by double layered reinforcement. The reinforcement ratio of the wall panel was 0.8%. In order to prevent from corrosion, epoxy coated steel bars were used in the top and bottom rigid edge beams. These test specimens were offered to the electrolytic corrosion test and exposure test in high salty environment in the semitropical and marine region at the coast in Okinawa Prefecture, Japan.

The concrete cylinder average strength was about 250kgf/cm^2. The 11 test specimens were provided. The 8 ones contained the soldium chloride solution (NaCl 3.3% sol.). Now, among them the 6 test specimens, in which the 3 NFM test specimens are included, are exposed at the coast in Okinawa. These exposed test specimens will be loaded laterally by a set of hydraulic jacks after one or several years. The other 5 test specimens were tested under the constant gravity load and alternately repeated lateral forces. One of them was the standard test specimen. The 2 specimens were arranged by the new fiber reinforced composite mesh. An electrolytic corrosion test was applied to the other 2 specimens with the steel reinforcing bars contained the soldium chloride solution. In this case, a steel mesh wrapped in gelatin was adopted as an electrode. This electrode was the same size as a wall panel and was attached on it. The loading apparatus was a cantilever type. As a result of this experimental investigation, the following conclusions were obtained.

1) The failure mode of normal test specimen was a flexural compressive failure type. The maximum lateral capacity was kept until a drift ratio reached approximately 1.0%. Then some loss of the lateral load due to the crushing at the bottom corner of the wall panel occurred gradually.
2) The ultimate lateral load of test specimens with electrochemical corrosion damages was obtained after the drift ratio reached over 0.5%. Especially, the ultimate loads were almost same regardless of corrosion damages. The cover concrete at the neighborhood of the bottom of wall panel spalled off and the buckling of the longitudinal reinforcing bars was observed at conclusion of loading. These test specimens, whose failure mode was similar to the brittle shear failure, resulted in the significant deterioration of the ductility.
3) The ultimate lateral load of the test specimens, which were arranged by the new fiber reinforced composite material (NFM), was superior to the other test specimens with reinforcing steel bars.

After drift ratio reached over 1.0%, the reinforcing bars made of NFM were partially broken. And the degradation of the lateral load capacity was observed in the hysteretic loops. The energy absorption capacity of these test specimens was slightly smaller than the other specimens because of lacking of the plastic range for the NFM. However, the durability of these test specimens will be expected in chloride attack environment.

Keywords : Aseismatic behavior, Corrosion, Reinforced concrete, Exposure test, Seismic hazard zoning, New fiver reinforced composite material, Durability, Chroride attack environment, Structural walls, Soldium chloride solution

1．序

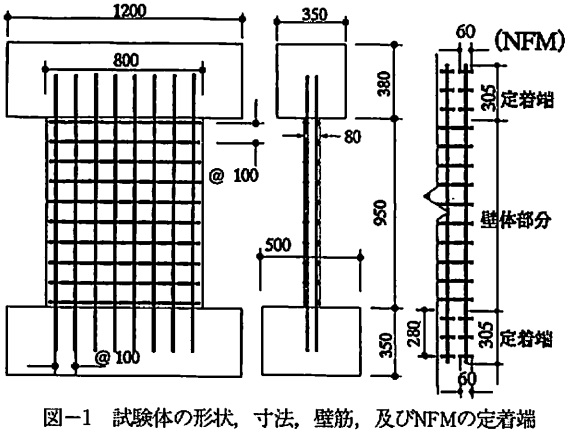
高温多湿の気候条件に加え，台風の度重なる襲来を受け，しかも塩風に年中吹きさらされるような島嶼地域に位置する沖縄では，塩害によるRC造構築物の劣化は従来の耐久性に加え，その耐震性を確保するうえで，重要な社会的課題であると考えられる．と同時に，本研究は沖縄と言う地域にとどまらず，強震地域に位置する日本及び諸外国のウォーターフロント地域におけるRC造構築物（原子力発電所やその関連施設も含む）の耐震性と耐久性が絡んだ共通課題として，とらえることも可能である．

しかしながら，今日まで鉄筋腐食によるRC造構築物の耐久性など材料的アプローチに多くの関心がむけられてきた．例えば，コンクリート中の鉄筋の発錆メカニズムと腐食評価法[1)2)3)]，及び鉄筋腐食によるRC造構築物の劣化機構や劣化過程の解明[4)]，そしてこれらの寿命予測や補修工法の開発[5)]など多くの研究がなされてきた．特に沖縄では，RC造の学校校舎[6)]や橋[7)]を中心とした塩害による被害調査も数多くなされてきた．そういう中にあって，鉄筋腐食がRC部材の力学性状に及ぼす影響については，RC梁の耐力[8)9)]や付着性状に注目した研究[10)]が散見される程度である．

したがって，本研究では亜熱帯の塩害環境下における沖縄において，鉄筋腐食がRC部材の耐震性能（剛性，耐力，じん性，エネルギー吸収量）に及ぼす影響を明らかにしようとする一つの試みである．その第一ステップとして，鉄筋のかぶり厚さが小さく，かつ腐食面積が大きい耐力壁を実験の対象に採用した．しかも，耐久性を比較検証する意味において，在来の鉄筋に代わり現在開発途上にある繊維強化複合材料（NFM…New Fiber reinforced composite Material）[11)]を壁筋に用いた耐力壁の実験も計画した．なお，本研究は今後この種の研究を推進するための第一歩であり，また継続して研究を行う予定である．

2．試験体

試験体の形状，寸法及び壁筋図を図－1に示す．壁筋には在来鉄筋のD6（公称断面積：0.32cm²），及びD6とほぼ同じ断面積（0.31cm²）を有する繊維強化複合材料（NFM）を用いた[11)]．このNFMは高強度の炭素繊維で構成された連続繊維を樹脂に含浸させながら，メッシュ状に一体成形したものである．NFMの周長は約2.2cmあり，D6の公称周長2cmより若干長いが，付着強度が鉄筋よりかなり小さいといわれている[11)]．したがって上，下梁の定着端にはフック付きのNFMが305mm（図－1参照）とってある（D6鉄筋は260mm）．壁筋



図－1　試験体の形状，寸法，壁筋，及びNFMの定着端

表－1　耐力壁の試験体一覧

	無塩	有塩（海水相当のNaCl 3.3重量%水溶液）			
	健全試験体	電食用試験体		自然暴露用試験体	
		総積算電流(923Ah)	総積算電流(1595Ah)	短期用	長期用
在来鉄筋	RCW-NN	RCW-SCe-1	RCW-SCe-2	RCW-SC-1	RCW-SC-2,3
	No1	No4	No5	No6	No8 No9
新素材 (NFM)	NFW-NN-1,2			NFW-SC-1	NFW-SC-2,3
	No2 No3			No7	No10 No11

注）網掛を施した耐力壁が今回加力実験の対象試験体（5体）であり，白抜きの（6体）は現在東シナ海に面した沖縄の海岸で暴露中である（1992年12月10日暴露開始）．

のピッチは縦横10cmで，壁厚8cmにダブル配筋（p_w=0.8%）してある．壁筋のかぶり厚は1.1cmである．ただし，電食及び自然暴露用試験体のダミー部に相当する上・下梁には，この部分の腐食を防止するためエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた．耐力壁の試験体一覧表を表－1に示す．表－1に示す各試験体ごとに，それぞれ3個のテストピースと，材料試験用壁板試験体を1体づつ用意した．この材料試験片（500×800×80mm）は図－1の壁板から水平方向に500mmの幅で切り出したものに相当する．これらは耐力壁試験体における壁筋の腐食状況や力学的性質をモニターするために用意されたものである．本研究で今回，一定軸圧縮力下（壁板の圧縮応力 σ ＝20kg/cm²）の正負繰り返し水平加力実験を行った耐力壁試験体は，表－1のNo.1からNo.5までの試験体である．残りのNo.6からNo.11までの耐力壁試験体は，これらに対応したテストピース及び材料試験用壁板とともに，東シナ海に面した沖縄の海岸で現在自然暴露中である．表－2,3に使用材料の力学的性質を示す．

表－2　鉄筋（D 6）と新素材（NFM）の力学的性質

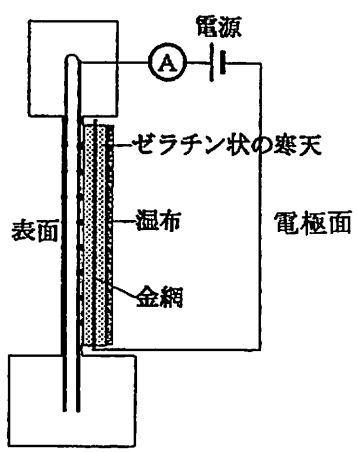
	a (cm²)	$_sσ_y$ (kg/cm²)	$_sε_y$ (%)	$_sσ_u$ (kg/cm²)	$_sE$ (×10⁶kg/cm²)
在来鉄筋（D6）	0.32	4380	0.24	4460	1.82
新素材（NFM）	0.31	18300	1.78	18300	1.01

表－3　コンクリートの力学及び材料的性質

試験体名（番号）		$_cσ_B$ (kg/cm²)	$_cε_1$ (%)	$_cE$ (×10⁵kg/cm²)	スランプ値 (cm)
無塩	RCW-NN (No1)	251	0.154	2.58	16.7
	NFW-NN-1 (No2)	290	0.193	2.68	16.7
	NFW-NN-2 (No3)	289	0.203	2.55	16.7
有塩（電食用）	RCW-SCe-1 (No4)	254	0.298	2.41	18.5
	RCW-SCe-2 (No5)	234	0.254	2.38	18.5

3．電食試験

壁筋を早期に腐食させるために，表－1のNo.4,5

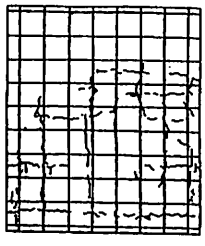
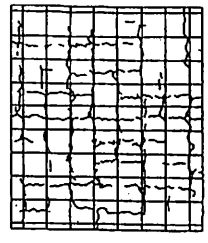


図－2　電食試験の概略図

表－4　腐食鉄筋（6本の平均値）の腐食減量と力学的性質

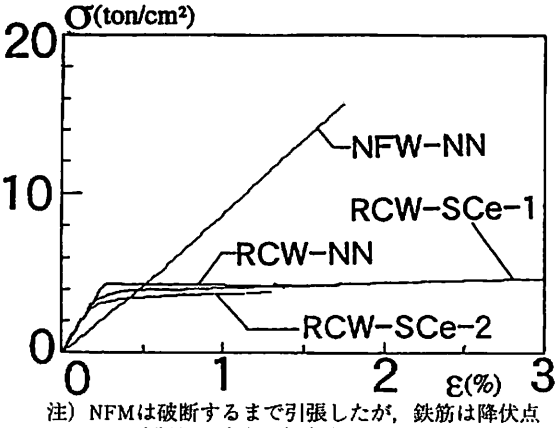
種別	腐食前の重量 W_0 (g)	腐食後の重量 W (g)	W/W_0	$_sσ_y$ (kg/cm²)
RCW-SCe-1	110.1	102.1	0.93	3732
RCW-SCe-2	111.3	95.4	0.86	2925

表－5　電食終了後の壁面のひび割れ状況

RCW-SCe-1　(923 A・h)		RCW-SCe-2　(1595 A・h)	
表　面	電極面	表　面	電極面
			

の試験体について電食を行った．電食は図－2にその概略図を示すように，金網をゼラチン状の寒天で包み込んだ電極板(壁板と同じ広さ)を壁板にあて，もう一方の電極である壁筋の間に電流を流した．これらのNo.4とNo.5の耐力壁試験体の総積算電流はそれぞれ923A・hと1595A・hである．No.4,5に対応する材料試験用壁板も同様に腐食面積にほぼ比例して電食させた．これらの総積算電流は各々461A・hと777A・hであった．材料試験用壁板に配筋した壁筋のうち，耐力壁の縦筋相当の鉄筋6本がモニター用鉄筋(D6で長さ45cm)である．これらのモニター用鉄筋は電食後，コンクリートをはつることにより取り出した．取り出した腐食鉄筋をクエン酸2アンモニウム水溶液に約24時間浸漬して腐食生成物を除去した．これらの鉄筋の腐食減量，及び腐食鉄筋の力学的性質を表－4に示す．さらに，健全な鉄筋やNFMを含めた応力-ひずみ曲線図を図－3に示す．但し，腐食鉄筋の断面積には腐食前の公称断面積0.32cm²を用いたので，図－3の応力は見かけ上の応力を示すことになる．また，腐食鉄筋のひずみは検長19.93cmにおける平均ひずみである．

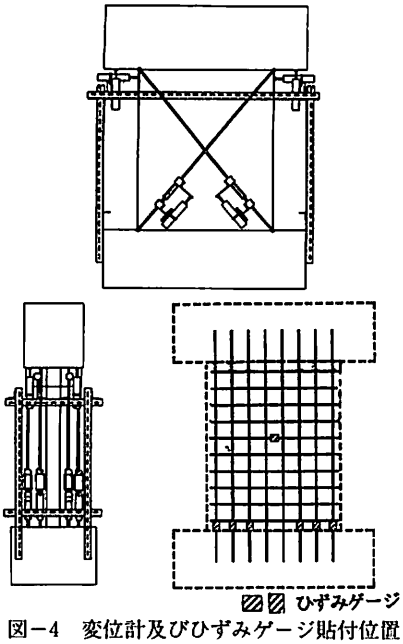
電食した耐力壁(RCW－SCe－1,2)の加力前の最終ひび割れ図を表－5に示す．壁筋は図－1に示すようにダブル配筋で，かつ両者は結束線で結ばれているので，電流は全ての壁筋に流れている．表－5より，コンクリートのひび割れは鉄筋の腐食に起因する膨張圧により，ほぼ壁筋に沿って生じている．総積算電流が大きい耐力壁(RCW－SCe－2)の最大ひび割れ幅は約3.0mmで，しかもひび割れ本数も多い．総積算電流が小さい耐力壁(RCW－SCe－1)の最大ひび割れ幅は約0.15mmであり，ひび割れ本数も少ない．



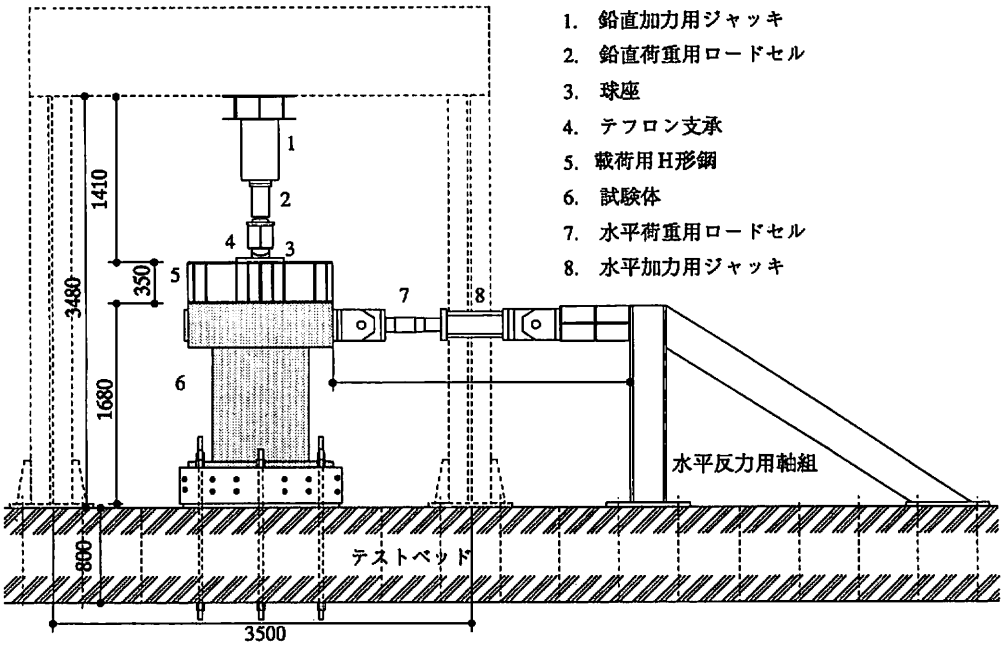
注）NFMは破断するまで引張したが，鉄筋は降伏点のみ確認して途中で加力を中断している．

図－3　腐食鉄筋，健全鉄筋，NFMの応力－ひずみ曲線

4．測定及び載荷方法



図－4　変位計及びひずみゲージ貼付位置



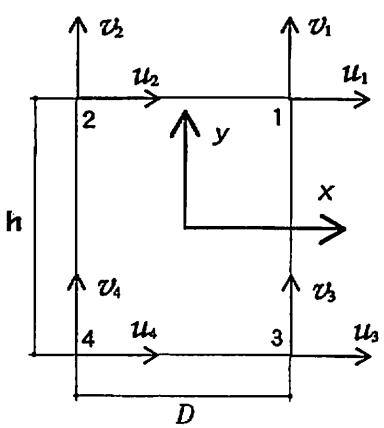
図－5 加力装置と耐力壁試験体セット状況

変位計による測定位置と壁筋のひずみゲージ貼付位置を図－4に示す.

一定軸圧力下（壁板の圧縮応力 $\sigma=20$kg/cm²）の正負繰り返し水平加力実験装置を図－5に示す. 図－5は片持ち柱タイプの加力実験装置を示し, 加力端は水平・上下移動と回転が拘束されない自由端になっている. 壁板脚部は基礎梁と, それに固着されたH形鋼を通してテストベッドに固定されている. 水平加力はひび割れが発生するまでは荷重制御により行い, ひび割れ発生後は壁板部分の層間変形角Rを0.25%づつ, 同一振幅で2サイクルづつ正負繰り返した.

5. 実験結果の解析と考察

表－6に各耐力壁試験体の層間変形角R≒0.25, 0.5, 0.75, 1%時と最終層間変形角時のひび割れ状況を示す. 各耐力壁試験体のQ－R曲線, 及びこれらのQ－R曲線から曲げ型変形R_B（上梁が傾斜することによって生ずる層間変形角）とせん断型変形R_S（上梁が傾斜することなく生ずる層間変形角）に分離する. 耐力壁の変形分離は山川・富井が文献12)で提案した変位に関する変換マトリックスを利用して行う. 山川・富井の方法に従い, 耐力壁の壁板四隅の節点変位（水平成分と鉛直成分）が正のベクトルとして, 図－6のように与えられるものとする. そうすると, (1)式に与える変換マトリックスにより, 図－6に示した壁板四隅の節点変位から, 表－7に示したひずみエネルギーをともなう各種変形と, 表－8に示した剛体変位を抽出することができる.



図－6 壁板四隅の正の節点変位

ひずみエネルギーをともなう主要な変形を, 壁板脚部の節点3,4（図－6参照）を不動点として表示しなおすと, 図－7のようになる.

図－7と表－7の間には(2)式が成立する．

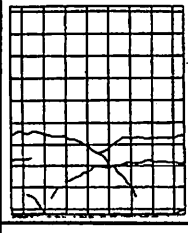
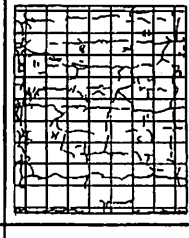
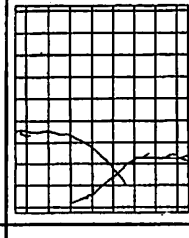
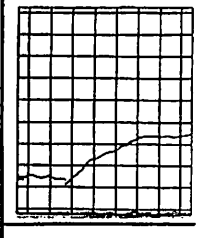
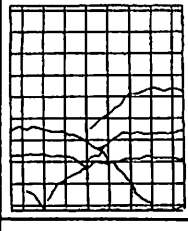
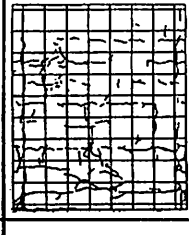
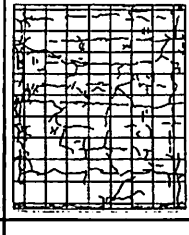
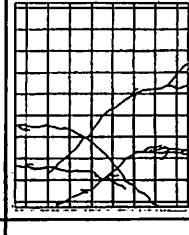
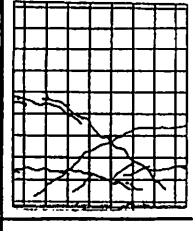
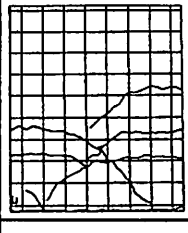
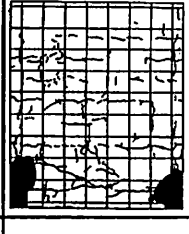
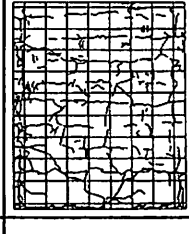
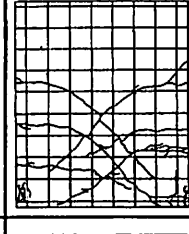
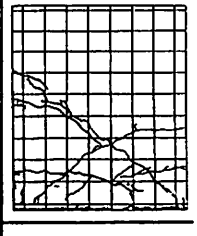
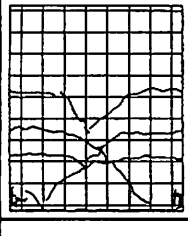
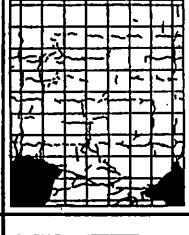
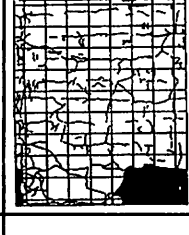
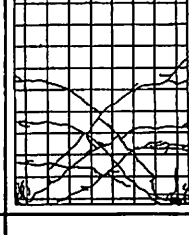
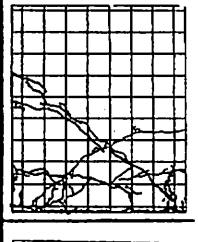
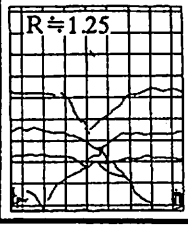
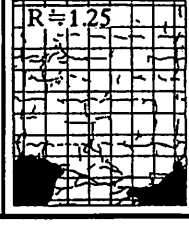
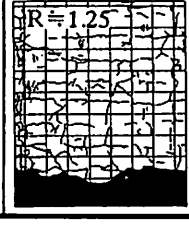
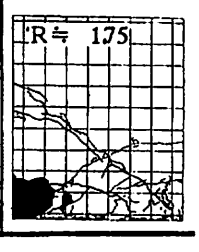
今回の実験では壁板脚部の隅点の変位(u_3, v_3, u_4, v_4)を零と仮定し，(1)，(2)式を適用した．したがって，(2)式が(3)式のように求まる．

(3)式から求まるδ_S，δ_Bを壁板の内のり高さhで除すると，それぞれ耐力壁の層間変形角R_S，R_Bが求まる．

また，δ_eをhで除すると図－8で示す鉛直方向の平均膨張ひずみが求まる．このようにして求めたQ-R_B，Q-R_S曲線を表－9に示す．

表－9によれば曲げ型変形とせん断型変形は，今回の実験の場合（M/QD=1.425），ほぼ同じ割合で含まれていることがわかる．ひび割れに起因する鉛直方向

表－6　一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平外力を受ける耐力壁の各層間変形角時の壁板(電極面)のひび割れ状況

層間変形角 (%)	健全鉄筋（無塩） RCW-NN	電食による腐食鉄筋（有塩） RCW-SCe-1(923Ah)	電食による腐食鉄筋（有塩） RCW-SCe-2(1595Ah)	新素材(NFM)（無塩） NFW-NN-1	新素材(NFM)（無塩） NFW-NN-2
0.25					
0.5					
0.75					
1.0					
最終層間変形角	 R≒1.25	 R≒1.25	 R≒1.25	R≒1.5	 R≒ 1.75

の膨張ひずみ ε_v と層間変形角Rの関係を図－8に示す．

表－9に示したQ－R曲線のスケルトンカーブ（実験結果）の比較を，図－9に示す．表－9，図－8,9より，電食した耐力壁（RCW-SCe-1,2）と健全な耐力壁（RCW-NN）とでは，明らかにその性状が異なる．鉄筋が腐食し，その膨張圧によってコンクリートが痛みつけられると，耐震性能が劣化することがこれらの図表よりわかる．特に，正負繰り返し水平外力によって電食した耐力壁のじん性が，確実に失われていることは注目に値する．

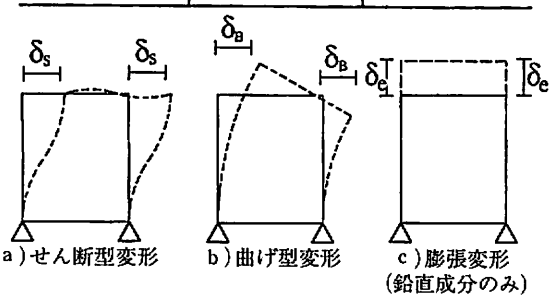
鉄筋が腐食するとRC部材の耐震性能が劣化するこ

表－7　壁板四隅の節点変位から求まる各種変形

変形の種類	ひずみエネルギーを伴う変位系
せん断型変形	u_S u_S / $-u_S$ $-u_S$ ($v_S=0$)
曲げ型変形	v_B $-v_B$ / $-v_B$ v_B ($u_B=0$) ; $-u_B$ u_B / u_B $-u_B$ ($v_B=0$)
伸縮変形	v_e v_e / $-v_e$ $-v_e$ ($u_e=0$) ; $-u_e$ u_e / $-u_e$ u_e ($v_e=0$)

表－8　壁板四隅の節点変位から求まる剛体変位

回転角	水平変位	鉛直変位
θ_0 ($u_0=v_0=0$)	u_0 ($\theta_0=v_0=0$)	v_0 ($\theta_0=u_0=0$)



図－7　壁板脚部の隅点を不動点とした時の主要な変形

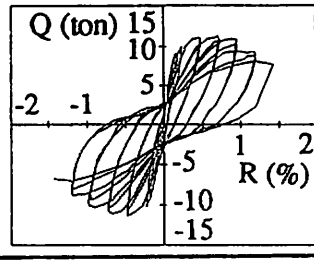
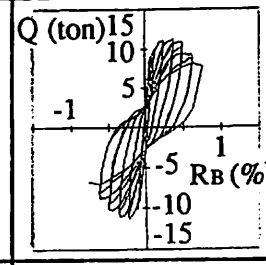
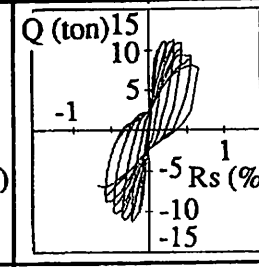
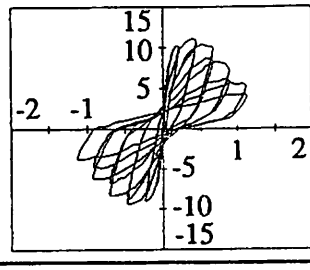
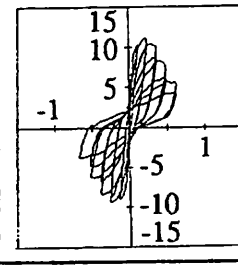
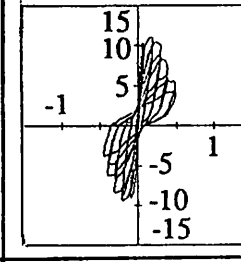
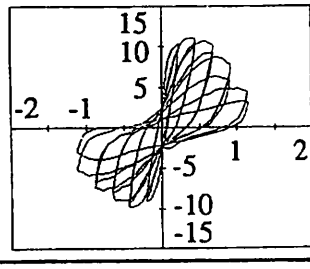
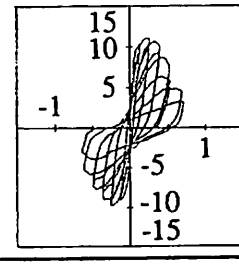
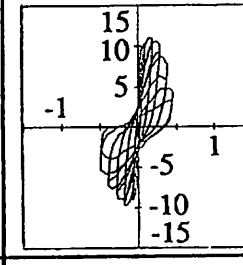
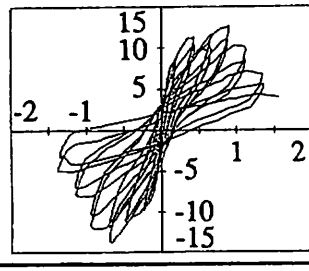
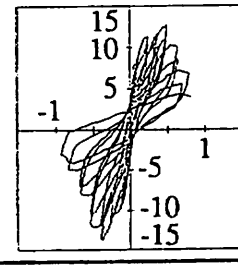
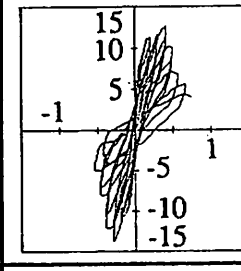
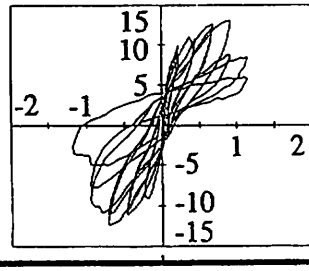
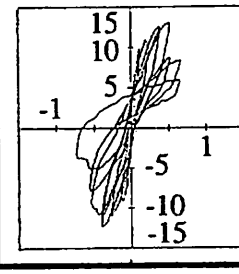
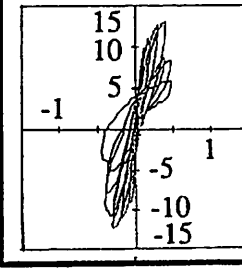
$$\begin{Bmatrix} u_S \\ v_B \\ u_B \\ v_e \\ u_e \\ h\theta_0 \\ v_0 \\ u_0 \end{Bmatrix} = \frac{1}{4}\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 & 1/\lambda & -1/\lambda & 1/\lambda & -1/\lambda \\ & & & & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & & & & \\ & & & & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & & & & \\ & & & & -2/\lambda & 2/\lambda & -2/\lambda & 2/\lambda \\ & & & & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & & & & \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{Bmatrix} \cdots (1)$$

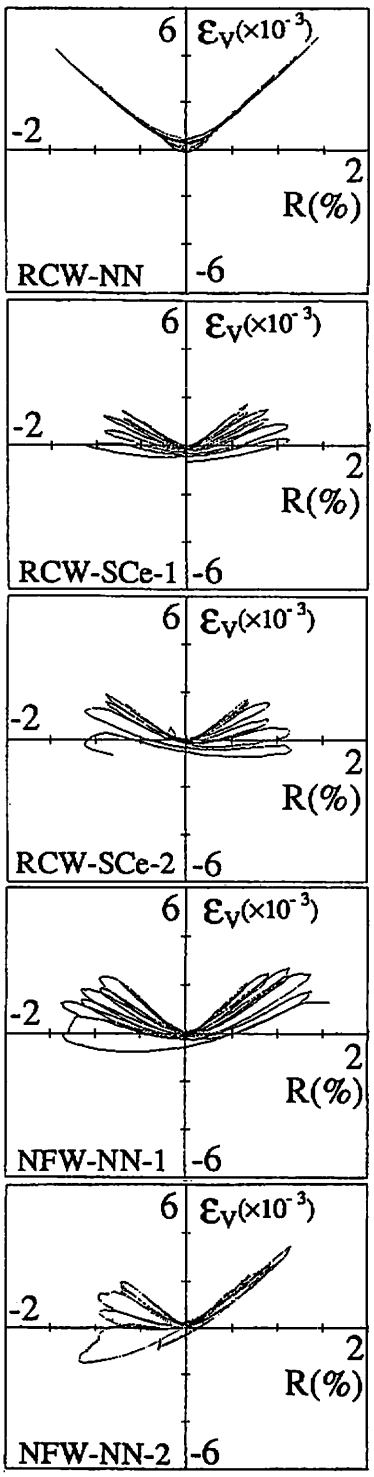
注）$\lambda = D/h$，かつ空欄の要素は零である．

$$\left.\begin{aligned} \delta_S &= 2u_S \\ \delta_B &= -\frac{2}{\lambda}v_B \\ \delta_e &= 2v_e \end{aligned}\right\} \cdots (2)$$

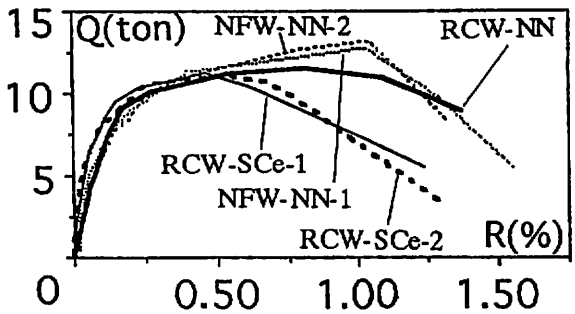
$$\left.\begin{aligned} \delta_S &= \frac{1}{2}\left(u_1+u_2+\frac{v_1-v_2}{\lambda}\right) \\ \delta_B &= -\frac{1}{2\lambda}(v_1-v_2) \\ \delta_e &= \frac{1}{2}(v_1+v_2) \end{aligned}\right\} \cdots (3)$$

表－9　各耐力壁のせん断力－層間変形角(Q-R)曲線(実験結果)

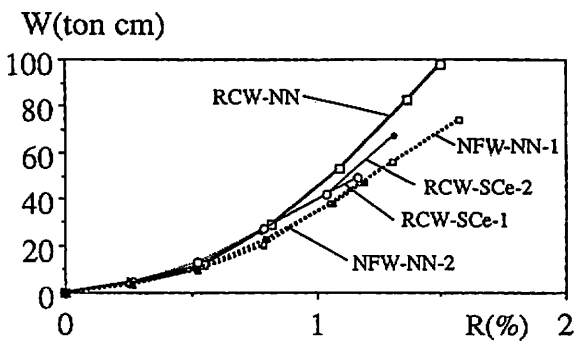
		全変形	曲げ型変形	せん断型変形
		Q-R 曲線	Q-R_B 曲線	Q-R_S 曲線
健全鉄筋（無塩）	RCW-NN			
腐食鉄筋（有塩）	RCW-SCe-1 (923A・h)			
	RCW-SCe-2 (1595A・h)			
新素材（無塩）	NFW-NN-1			
	NFW-NN-2			



図－8　各耐力壁の鉛直方向の膨張ひずみと層間変形角の比較



図－9　各耐力壁のスケルトンカーブ（実験結果）



図－10　各耐力壁の累積エネルギー吸収力Wと層間変形角Rとの関係（実験結果）

とは図－10に示した各耐力壁の累積エネルギー吸収量Wと層間変形角Rとの関係からも明らかである．ただし，層間変形角が小さい間は電食した耐力壁(RCW-SCe-1,2)の水平剛性も，エネルギー吸収能力も健全な耐力壁（RCW-NN）に比較してやや大きいか，ほぼ等しいことは注目される．なお，RCW-NNの初期水平剛性が低いのは，本実験の最初の試験体として機器調整のため，初期に小さい荷重レベルで何回か正負繰り返し水平加力を行った後，測定を開始したので，初期ひび割れを看過した疑いが強い．このことは図－18に示した理論解析結果からもある程度推測される．

NFMを用いた耐力壁（NFW-NN-1,2）は前述したように，NFMの材料特性が反映された実験結果になっている．ただ，図－9に示すように層間変形角が1％を越えるところまで，水平耐力が除々に増大していることは注目される．

耐力壁は健全壁筋，腐食壁筋及び新素材壁筋(NFM)の3グループに分類される．これらの耐力壁が最大強度に達し，破壊に至るプロセスの特色は次のように整理される．

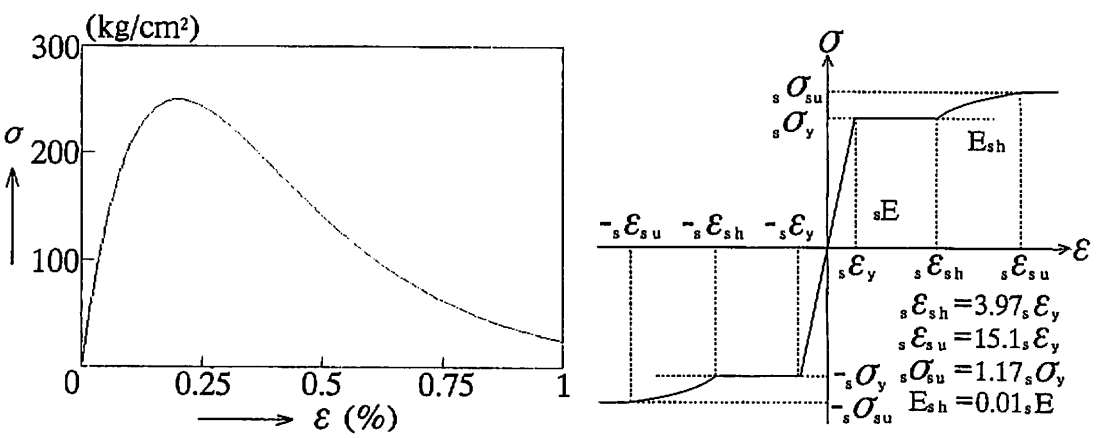
1) RCW-NN(健全鉄筋)は最外縁の壁筋から順に引張降伏すると同時に，圧縮側コンクリートの圧壊が徐々に始まり，Rが1％を越えると徐々に耐力が低下していく．しかも，その時点になると壁脚部には曲げひび割れが完全に貫通している．

2) RCW-SCe-1,2(腐食壁筋)はともにR=0.5％程度で最大強度に達すると同時に(表－9，図－9参照)，腐食鉄筋の膨張圧によって破損したカバーコンクリートが壁脚部の広い範囲にわたって剝落する(表－6参照)．それと同時に外縁部の壁筋は破断し，中央部の壁筋は座屈し，耐力の低下が生ずる．しかし，RCW－NNにみられた壁脚部の曲げひび割れ貫通はなく，壁脚部より上にあがったところが全体的に破壊された感じであった．総積算電流の差異は加力前の耐力壁のひび割れ状態（クラックの幅と本数）に影響を与えたが(表－5,6参照)，Q－R曲線(表－9，図－9参照)にはほとんど差異を与えなかった．

3) NFW-NN-1,2(新素材筋)は同一の試験体で，実験結果はほぼ同じである．図－3に示すようにNFMが鉄筋と異なりヤング係数が小さく，しかも降伏ひずみと破断ひずみが同じであり，塑性領域が存在しない．したがって，層間変形角Rが1％ぐらいまで徐々に耐力が増大した後，最外縁の壁筋から順に破断し，そのたびごとに耐力が急激に低下していく傾向を示す．さらに，NFMが弾性体として挙動するのでエネルギー吸収能力がやや小さい傾向にある(図－10参照)．すなわち，NFMの力学特性が耐力壁の水平加力実験結果にもそのまま反映されている．

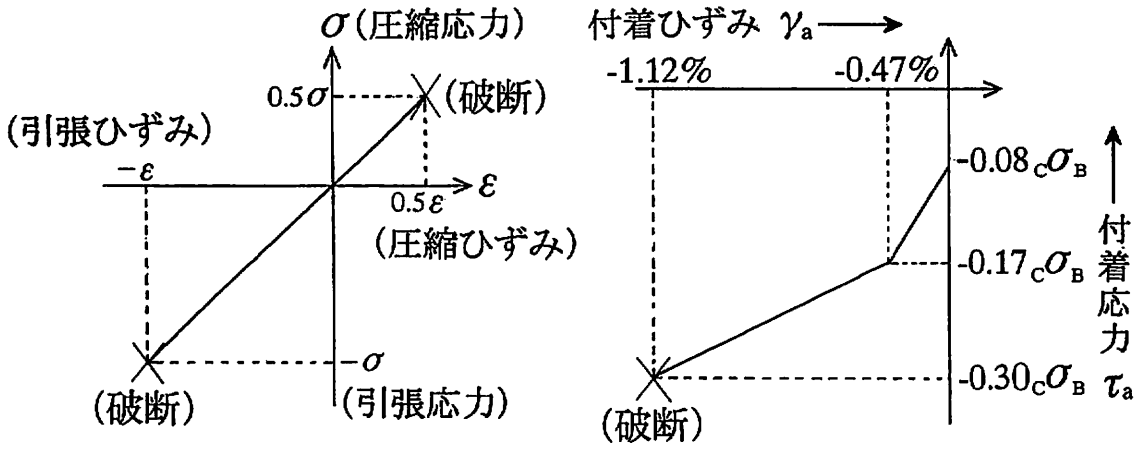
6. 理論解析（実験結果との比較）

耐力壁の水平断面を多段配筋された長方形断面とみなし，断面分割法による通常の曲げ強度解析を試みる．ただし，コンクリートの応力－ひずみ関係式には梅村のｅ関数[13]を用いた．このｅ関数により計算したコンクリートの応力－ひずみ曲線を図－11(a)に示す．なお，解析に用いるコンクリート，鉄筋，腐食鉄筋，NFMなどの材料定数は本論の2節，3節に記載した表－2～4，図－3より与えた．柱せいに相当する耐力壁の幅(スパン)Dが大きいので，最外縁部やその近傍の壁筋は過大な引張ひずみを受ける．したがって，鉄筋に関しては図－11(b)に示すように，ひずみ硬化を考慮する．腐食鉄筋にも図－11(b)のひずみ硬化を同様に考慮した．ただし，表－4の腐食鉄筋（RCW-SCe-1）の${}_s\sigma_y$と，表－2の健全鉄筋${}_s\sigma_y$の比にしたがって算出した腐食鉄筋の等価断面積を用いた．この比は0.85になり，それは表－4の重量比W/W_0より小さい．これは腐食が鉄筋にそって一様に生じていないからである．なお，NFMは鉄筋と異なり，その材料力学的特性が異なるので[11]，図－12(a)，(b)に示すような仮定を用いた．特にNFMに関してのみ，壁縦筋の基礎梁定着端からの抜け出しを考慮するために，図－12(b)の関係を用いた．その図における付着ひずみとは，NFM筋の抜け出し量を定着長さ（本試験体の場合280mm，図－1参照）で除した見かけ上の平均すべりひずみに相当する[14]．しかも，$\tau_a-\gamma_a$関係は引張場にのみ適用し，圧縮場には適用しない．さらに，



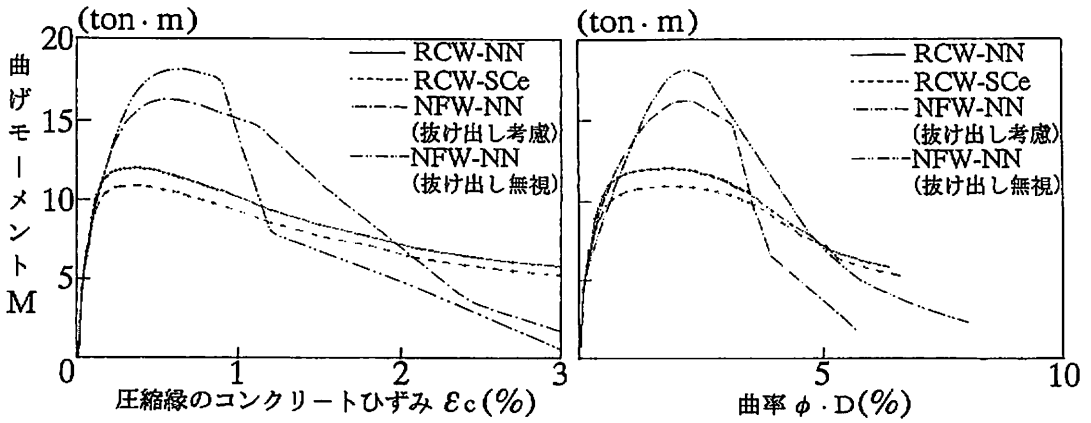
a）ｅ関数によるコンクリートの応力－ひずみ関係　　b）ひずみ硬化を考慮した鉄筋の応力－ひずみ関係

図－11　コンクリートと鉄筋の各応力－ひずみ($\sigma-\varepsilon$)関係



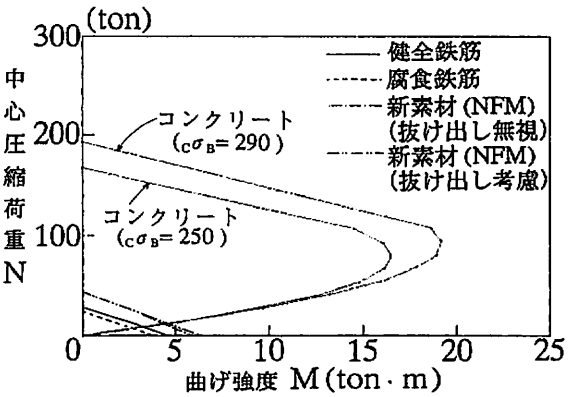
a）NFMのσ－ε関係　　b）NFMのτ_a－γ_a関係

図－12　新素材(NFM)のσ－ε，およびτ_a－γ_a関係

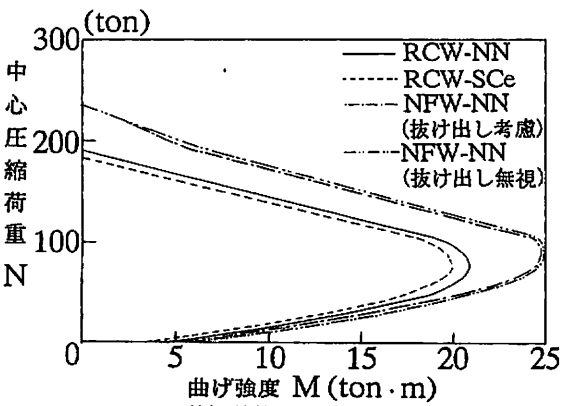


a）曲げモーメントと圧縮最外縁のコンクリートひずみの関係　　b）曲げモーメントと曲率の関係

図－13　断面分割法で求めた耐力壁水平断面の曲げモーメントMと圧縮最外縁のコンクリートのひずみε_c，曲率φ・Dとの関係

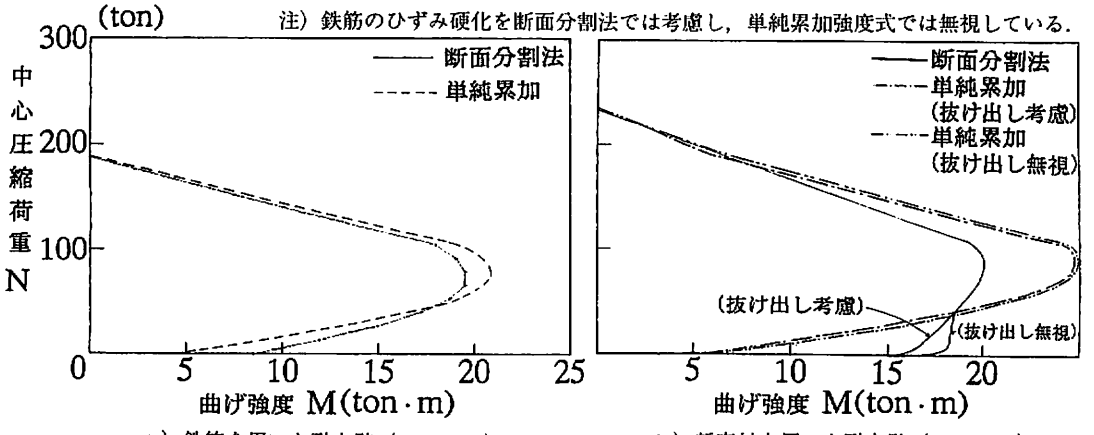


注）鉄筋のひずみ硬化は無視



注）鉄筋のひずみ硬化は無視

図－14　壁筋と無筋コンクリートの各N－M相関曲線　　図－15　単純累加強度式で求めた各耐力壁のN－M相関曲線

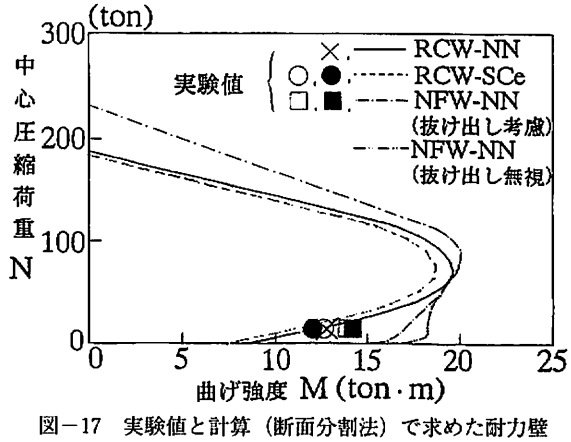


a）鉄筋を用いた耐力壁（RCW-NN）　b）新素材を用いた耐力壁（NFW-NN）

図－16　断面分割法と単純累加強度式によりそれぞれ求めた耐力壁のN－M相関曲線の比較

NFMに対しては図－12に示すように壁筋の破断を考慮した．文献11)によれば，圧縮破断強度は引張破断強度の約1/2になっている．以上の仮定のもとで断面分割法により計算した耐力壁水平断面の曲げモーメントと，圧縮最外縁のコンクリートひずみ，および曲率との関係を図－13に示す．断面分割法で求めた壁筋と無筋コンクリートの各N－M相関曲線を図－14に示す．図－14より単純累加強度式で求めた各耐力壁のN－M相関曲線を，図－15に示す．図－16には断面分割法と単純累加強度式により，それぞれ求めた耐力壁のN－M相関曲線の比較を示す．鉄筋を壁筋に用いたRCW-NNでは，両者は比較的一致しているが，新素材(NFM)を用いたNFW-NNでは，かなり異なった傾向を示している．この主な原因は壁筋と無筋コンクリートの各中立軸に加えて，新素材の応力－ひずみ曲線とコンクリートのそれが，それぞれ大きく異なっているからだと思われる．断面分割法で正確に求めた耐力壁のN－M相関曲線上に，実験値をプロットした図を図－17に示す．計算値は新素材を除いて実験値をほぼとらえているようである．

せん断力Qと層間変形角Rの関係を断面の曲げ強度解析から求めるためには，耐力壁の高さ方向に曲率分布ϕを仮定する必要がある．図－13に示したM－ϕ・D関係において曲線の勾配をSとし，その初期勾配をS_0とする．これらの勾配Sと曲率ϕの関係を表－10のように仮定する．ただし，電食試験体(RCW-SCe-1,2)に関してのみは，塑性ヒンジ領域をD/5と仮定する．表－10のように仮定したϕに補仮想仕事の原理，またはモールの定理を適用することにより曲げ変形を計

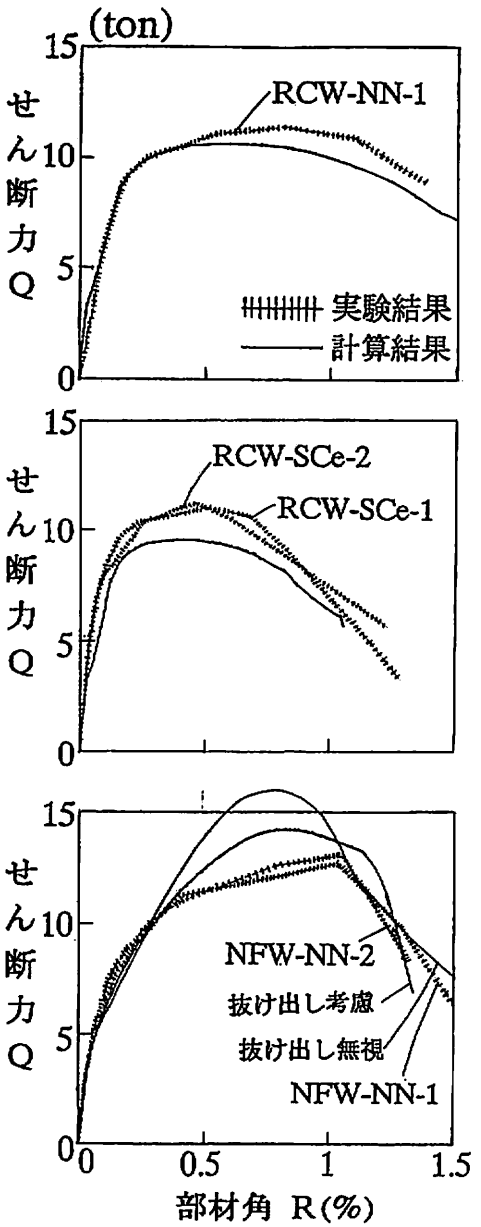


図－17　実験値と計算（断面分割法）で求めた耐力壁のN－M相関曲線の比較

表－10　M－ϕ・D曲線における勾配Sと耐力壁の材軸に沿った曲率分布の仮定

$S > 0.9S_0$	$0.9S_0 > S > 0.2S_0$	$0.2S_0 > S$
$\phi < \phi_y$	$\phi = \phi_y$　$\phi < \phi_y$	$\phi > \phi_y$
h	⇒ D/3	D/3

算し，その上にせん断変形を加算する．しかもP－δ効果も考慮する．電食した試験体の計算に用いるコンクリートや鉄筋の材料定数は，表－3，4及び図－3に示したRCW-SCe-1(総積算電流量が少ない方)を用い



図－18 Q－R関係の実験結果と計算結果との比較

た．鉄筋が腐食すると，その周辺に腐食生成層が形成されたり，ひび割れに伴うコンクリートの圧縮強度低下などが考えられるが，これらの影響は全て解析上無視した．破壊の様相が異なる電食試験体にも，通常の曲げ強度解析を参考までに試みた．このようにして求めたQ－R曲線を図－18に示す．計算結果は実験結果をほぼとらえているようである．特に，NFMでは定着端からの引き抜き（付着ずれ）が生じないように，設計上配慮することが必要であると思われる．

最後に本実験結果の一覧表を表－11に示す．

7．結論と今後の研究課題

1）本試験体が健全な鉄筋であれば引張り側の壁筋が引張り降伏し，次いで圧縮側のコンクリートが圧壊するまで水平耐力を維持する曲げ圧壊型の試験体(M/QD=114/80=1.425)である。

2）電食により鉄筋が腐食すると，初期剛性は若干上昇するものの最大耐力は若干小さく，かつじん性やエネルギー吸収能力が層間変形角Rの増大とともに顕著に劣化し，せん断破壊型の試験体に類似してくる．すなわち、電食試験体は健全試験体に比較して剛性はやや高く耐力はほぼ同じであるが，じん性が小さい．特にじん性が小さいことは，従来の梁の単調載荷実験からは見られなかった新しい現象であり，今後さらに検討すべく重要な課題ではないかと考えられる．

3）繊維強化複合材料(NFM)を，曲げ補強筋としての在来鉄筋やエポキシ樹脂塗装鉄筋などと併用すれば，構造用補強筋としての活用がさらに期待できそうである．ただし，NFMの定着や付着，及び過大なひずみに対する破断等に関しては注意を払う必要がある．

以上の結論をふまえて，今後の研究課題として次の項目を考えている．

1）今回の実験で明らかになった鉄筋腐食にともなう耐力壁のじん性劣化は，さらに詳細に検討すべく重要

表－11 実験結果一覧表

試験体名	最大耐力 Q(ton)		最大平均せん断応力 τ (kg/cm²)		最大耐力時の層間変形角 R(%)		累積エネルギー吸収量 (t・cm)			
	正側	負側	正側	負側	正側	負側	0.25(%)	0.5(%)	0.75(%)	1.0(%)
RCW-NN	11.4	11.4	17.8	17.8	0.72	0.47	4.3	12.0	28.9	53.3
RCW-SCe-1	11.2	9.4	17.5	14.7	0.41	0.48	3.7	11.4	26.0	42.1
RCW-SCe-2	11.0	9.7	17.2	15.2	0.46	0.46	3.7	13.0	27.3	42.0
NFW-NN-1	12.7	13.8	19.8	21.6	0.93	0.68	3.8	9.9	20.5	37.9
NFW-NN-2	13.1	12.4	20.5	19.4	0.95	0.72	3.4	10.2	22.5	37.9

な研究課題といえる．たとえ，コンクリートに明瞭なひび割れが生じていなくても，鉄筋が腐食し膨張圧が蓄積されていれば，正負繰り返し水平外力により，耐力壁のじん性劣化が観察されるのではないかと考えられる．したがって，今回の実験より総積算電流量が少ない耐力壁の補充実験を行う必要がある．

2）繊維強化複合材料(NFM)を壁筋に用いた耐力壁(NFW)に，曲げ補強筋として在来鉄筋やエポキシ樹脂塗装鉄筋を壁縁部にのみ配筋した耐力壁の補充実験も計画する．

3）鉄筋腐食に関する材料試験データと，鉄筋腐食にともなうRC部材の耐震性能劣化との相互関係を明らかにする必要がある．このために必要な実験計画を検討する．

4）耐力壁の自然暴露実験(表－1参照)において，鉄筋腐食による壁板のひび割れ状況を観察するとともに，適当な時期にこれらの試験体を構造実験室に運び，一定軸圧縮力下の正負繰り返し実験を行う．

5）自然暴露においてNFMの耐久性を確認する．NFMは曲げ用主筋として利用するよりも，横補強材として利用した方が望ましいと考えられる．したがって，柱の主筋に在来の鉄筋を用い，帯筋にNFMを用いた柱の水平加力実験を暴露試験も含めて計画する．

6）鉄筋コンクリート柱(RC柱)の暴露試験と水平加力実験を行い，RC柱の鉄筋腐食と耐震性能との関係を明らかにする．

7）RC柱の水平加力実験と関連させて，鉄筋腐食にともなう付着強度実験を計画する．

謝　辞

本研究の一部は平成4年度の琉球大学特定研究費によった．なお，繊維強化複合材料(NFM)を用いた耐力壁の実験は，清水建設㈱との共同研究である．清水建設㈱技術研究所・主席研究員・森永繁博士，同技術開発本部の藤崎忠志氏に本研究に関して種々のご教示とご協力，ご支援をいただきました．清水建設㈱技術研究所・所長補佐・磯畑脩博士にはこのような共同研究のきっかけと，種々の環境を用意していただきました．また，清水建設㈱技術研究所・田中伸幸主任研究員，九州大学教授・崎野健治博士，九州共立大学教授・江崎文也博士，大分大学助教授・菊池健児博士，藤原文夫・九州大学文部技官，㈱竹中工務店技術研究所・毛井崇博主任研究員ほか多くの皆様に実験上の諸問題に関して種々のご指導，ご教示をいただきました．さらに，測定器具の一部を青木治・前九州大学文部技官（現九州共立大学技術員）に製作していただきました．そのほかに，琉球大学工学部附属工作工場の皆様に一部ご協力をあおぐとともに，試験体のコンクリート打設には玉那覇宣雄・琉球大学文部技官のご協力を得ました．なお，PC鋼棒は高周波熱錬㈱，エポキシ樹脂塗装鉄筋は安治川鉄工建設㈱に各々提供していただきました．テフロン支承はオイレス工業㈱，加力装置や治具関係は地元沖縄の金秀建設㈱，島袋鉄工所，生コンは沖縄県生コンクリート工業組合，大城物産に，そのほか多くの皆様にいろいろとお世話になりました．さらに，試験体の自然暴露試験に関しては沖縄県，浦添宜野湾漁業共同組合の許可とご協力を得ました．ここに記して，関係各位に厚くお礼を申し上げます．なお，共著者の一人である玉城康哉は本研究に関して，1992年度日本建築学会九州支部奨励研究助成金の交付を受けた．

参考文献

1）具志 幸昌：“亜熱帯・海洋性気候下におけるコンクリート中の鉄筋の発錆および防錆に関する実験的研究”，琉球大学工学部紀要，第34号，1987年10月

2）岸谷 孝一：“鉄筋コンクリート構造物における鉄筋の腐食について”，コンクリートジャーナル Vol.12，No.2，pp.1-16，Feb.1974

3）大城 武　他２名：“塩害を受けたRC構造物の腐食評価法について”，コンクリート工学年次論文報告集14-1，pp.649-654，1991年

4）魚本 健人　他２名：“鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化機構に関する基礎的研究”，第６回コンクリート工学年次講演論文集，pp.173-176，1984年

5）森永 繁：“鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究”，東京大学学位請求論文，1986年11月

6）岸谷 孝一：“海砂とコンクリート，９．４那覇市における小・中学校校舎の被害状況”，コンクリートジャーナル Vol.12，No.10，pp.67-71，Oct.1974

7）大城 武　他２名：“鉄筋コンクリート橋の塩害について”，第６回コンクリート工学年次論文報告集，pp.165-168，1984年

8）武若 耕司　他１名：“コンクリート中の鉄筋腐食がRC部材の力学的性状に及ぼす影響”，第６回コンクリート工学年次講演論文集，pp.177-180，1984年

9）中田 泰広，丸山 久一　他２名："鉄筋腐食によるひびわれが梁供試体の耐荷性状に及ぼす影響"，コンクリート工学年次論文報告集 12-1，pp.551-556，1990年

10）山田 義智："塩害を受けたRC部材の鉄筋とコンクリート間の付着性状に関する研究"，日本建築学会研究報告九州支部第33号.1（構造系），pp.181-184，1992年3月

11）杉田 稔，中辻 照幸，藤崎 忠志　他多数："繊維強化複合素材(NFM)の建築構造への利用に関する研究　その1－その13"，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），（関東），（九州），（中国），pp.131-138，pp.813-818，pp.147-150，pp.959-966，1987 年，1988年，1989年，1990年

12）山川 哲雄，富井 政英："節点外力と節点変位に関する各基本成分とＩ形梁理論で求める節点剛性マトリックスー耐震壁の節点剛性マトリックスに関する実用解（その1）－"，日本建築学会構造系論文報告集，第413号，pp.97-106，1990年7月

13）梅村 魁："鋼筋コンクリート梁の塑性変形及び終局強度"，日本建築学会論文集，第42号，pp.59-70，1951年2月

14）山川 哲雄，山田 義智："鋼管と帯筋で二重に横補強したRC短柱の弾塑性解析　その1，2"，日本建築学会学術講演梗概集（東北），pp.231-234，1991年9月